

ВЫБОР АРХИТЕКТУРЫ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГАЗОТУРБИННОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Килин Г. А.¹, Кавалеров Б. В.¹, Масягин Е. Д.¹

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия, thisisforasm@rambler.ru

Аннотация – В статье представлены результаты тестирования различных архитектур искусственной нейронной сети для получения математической модели газотурбинной электростанции.

Ключевые слова – математическая модель, искусственная нейронная сеть, газотурбинная электростанция, система автоматического управления.

I. ВВЕДЕНИЕ

Электроэнергетика играет ключевую роль, как в жизни человека, так и в промышленности, и, как следствие, целой страны. Практика развития энергетических систем зарубежных стран мира [1, 2] показывает высокое распространение газотурбинных установок в энергетике.

Электрический КПД современных ГТУ составляет около 33–39%. С учетом того, что в мощных газотурбинных установках происходит выхлоп газов высокой температуры, появляется возможность комбинированного использования газовых и паровых турбин. Такое инженерное решение позволяет меньше использовать топливо, а, следовательно, существенно повысить эффективность электрического КПД установок до 57–59%.

Чтобы воспользоваться всеми преимуществами использования газотурбинной установки (ГТУ) для выработки электроэнергии необходимо управлять не только установкой, но и электростанцией в целом. К сожалению, процедура настройки системы автоматического управления (САУ) газотурбинной электростанцией (ГТЭС, рис.1) является трудозатратной. Одним из способов облегчения настройки САУ является её настройка на математической модели [3 - 5], которую можно получить с помощью искусственной нейронной сети (ИНС).



Рис. 1. Структурная схема модели ГТЭС

На рис. 1. обозначено: G_T – расход топливного газа ГТУ, U_f – напряжение возбуждения синхронного

генератора, N_G – активная мощность синхронного генератора, U – напряжение на генераторе, I – ток генератора.

II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГАЗОТУРБИННОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Управление, осуществляемое без участия человека, называют автоматическим, а техническое устройство, которое осуществляет такое управление, называют контроллером или регулятором. Всю систему, включающую регулятор и объект управления, называют САУ.

В нашем случае система управления для ГТЭС является замкнутой, так как управление происходит в замкнутом контуре по выходному параметру, который необходимо поддерживать постоянно.

При проектировании и настройке САУ ГТУ главной целью является поддержание постоянной частоты вращения свободной турбины в каждый момент времени через требуемый расход топлива.

Большинство известных подходов к настройке САУ достаточно устарели и не способны показать приемлемых результатов. Причина заключается в том, что они основаны на большом количестве упрощений. Поэтому необходимо разрабатывать новые альтернативные варианты для настройки регулятора ГТУ, например, на основе модельно ориентированного подхода (МОП) рис. 2

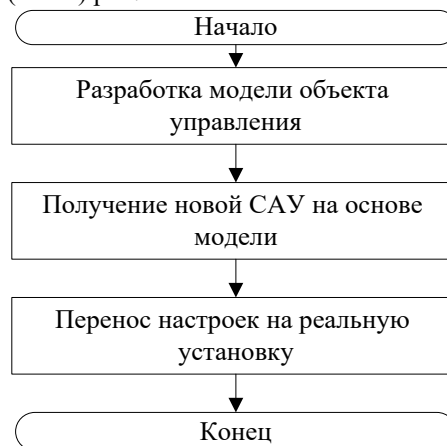


Рис. 2. Алгоритм настройки САУ ГТУ с использованием МОП

Основная идея МОП заключается в том, чтобы на основе него получить приемлемой точности модель объекта управления, и уже благодаря ей настраивать параметры регулятора [6-12].

III. НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ

Нейронные сети находят свое применение во многих задачах. В статьях [13-16] нейронные сети используются для распознавания изображений, при этом они справляются с этой задачей намного лучше, чем другие алгоритмы. Нейронные сети могут применяться даже в задачах определения эмоциональной реакции человека [17]. Но самое главное заключается в том, что нейронные сети могут, применяются для получения математических моделей объектов управления, в частности ГТУ, либо их агрегатов [18 – 20]. Как газотурбинная установка, так и газотурбинная электростанция является нелинейной системой [21], а значит, нейронные сети могут быть аппроксимированы в любой вид нелинейности [22-24].

Тут же необходимо отметить и другую особенность нейронных сетей. В отличие от модели на основе уравнений регрессии, модель, построенная на основе нейронной сети, позволит не задавать структуру взаимодействия внутренних параметров ГТУ и

газотурбинной электростанции. Такое преимущество предоставляет нейронная сеть, так как этот процесс происходит автоматически, в ходе процесса обучения [22-25]. Благодаря этому достигается автоматизация процесса получения модели, что позволит проводить эксперименты на сложной модели или на реальной установке [26-28] и, получив необходимые экспериментальные данные, подать их на нейронную сеть и запустить процесс обучения. В итоге оператор (человек) только участвует в процессе получения экспериментальных данных, а сам процесс получения математической модели системы ГТУ-СГ происходит автоматически под его наблюдением.

Но кроме того у нейронных сетей есть ещё одна уникальная особенность это обобщающая способность [22-25], главная особенность которой заключается в том, что подавая на вход модели данные, которых ранее не было в обучающей выборке, модель так же выдаст приемлемые значения на выходе. На рис. 3 представлен пример архитектуры нейронной сети, которая применялась для получения математической модели ГТЭС.

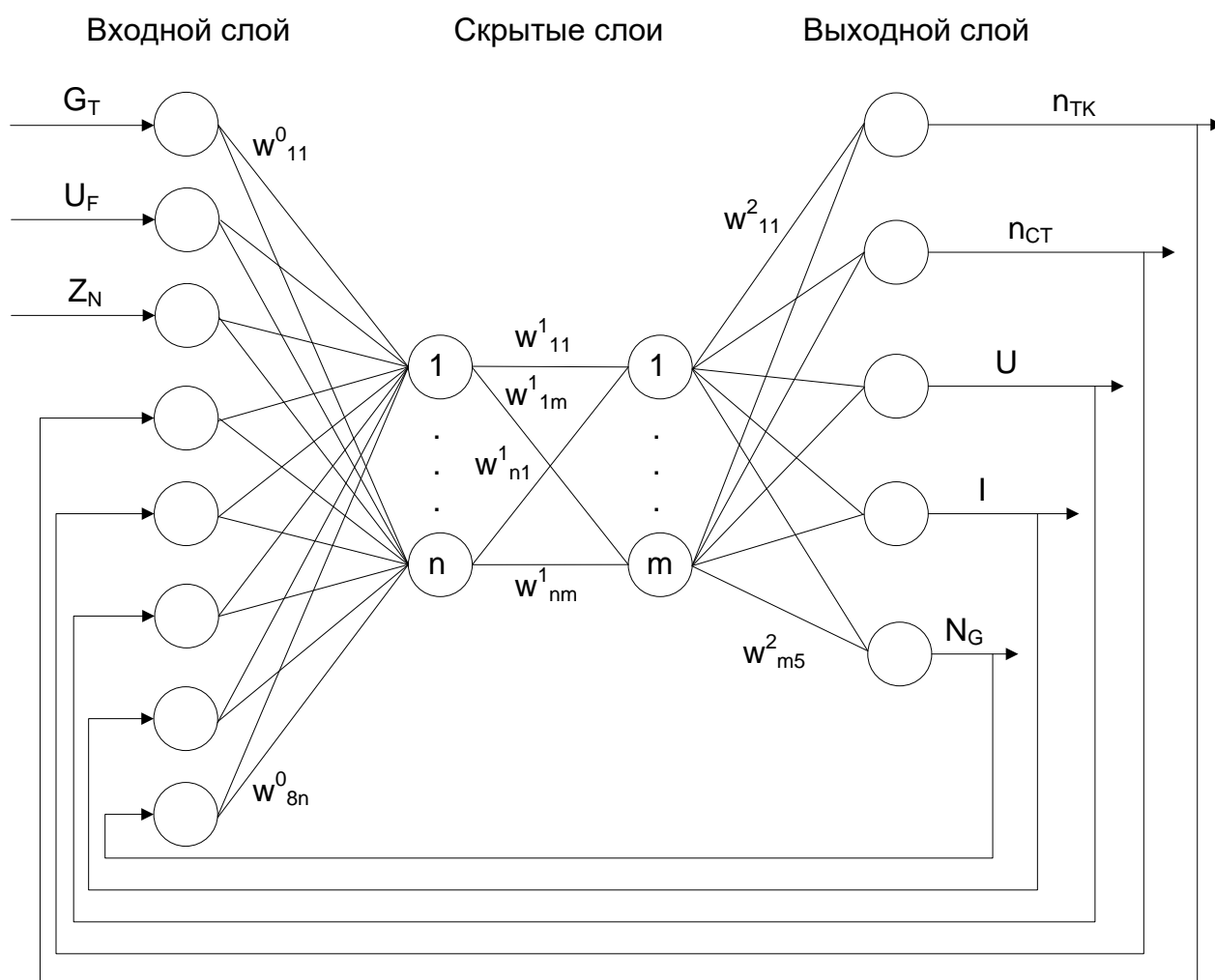


Рис. 3 Архитектура нейронной сети

где: n_{TK} – частота вращения турбокомпрессора;
 n_{CT} – частота вращения свободной турбины;
 U – напряжение СГ;
 N_G – активная мощность СГ;
 U_f – напряжение возбуждения;
 G_T – расход топлива;
 U_F – напряжение обмотки возбуждения;
 Z_N – статическая нагрузка СГ;
 w_{bc}^a – весовой коэффициент связи (a – индекс таблицы весов, b – номер нейрона в слое откуда идет связь, c – номер нейрона в слое куда приходит связь).

IV. ПЕРВАЯ ТЕСТИРУЕМАЯ АРХИТЕКТУРА

Используя архитектуру 3 слоя и 20 нейронов в каждом скрытом слое, без обратной связи в ходе обучения алгоритма, была получена математическая модель. Работа модели была проверена на обучающей выборке.

Результаты сравнения экспериментальных и модельных данных представлены на рис. 4 и рис. 5.

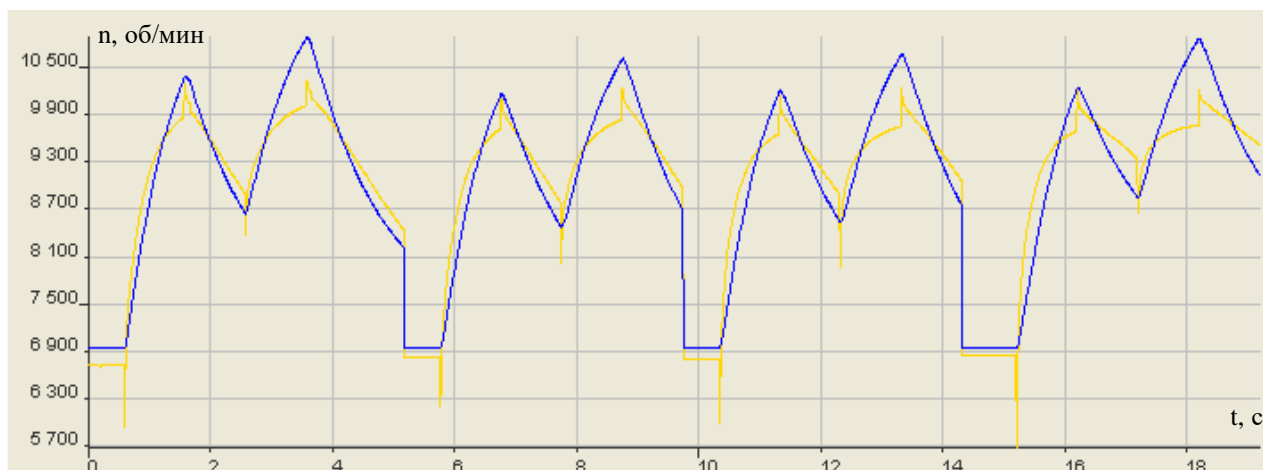


Рис. 4. Изменение частоты вращения свободной турбины в обучающей выборке (синяя экспериментальная, желтая модельная)



Рис. 5. Изменение вырабатываемой активной мощности синхронного генератора в обучающей выборке (розовая экспериментальная, синяя модельная)

V. ВТОРАЯ ТЕСТИРУЕМАЯ АРХИТЕКТУРА

Используя архитектуру 3 слоя и 40 нейронов в каждом скрытом слое без обратной связи в ходе обучения алгоритма, также была получена математическая модель, и её результаты были сравнены с обучающей выборкой.

Результаты сравнения экспериментальных и модельных данных представлены на рис. 6 и рис. 7.

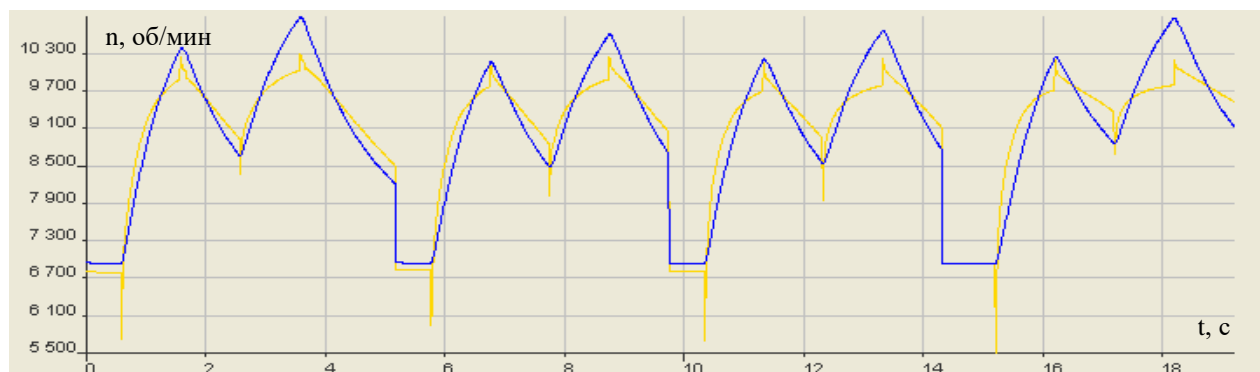


Рис. 6. Изменение частоты вращения свободной турбины в обучающей выборке (синяя экспериментальная, желтая модельная)

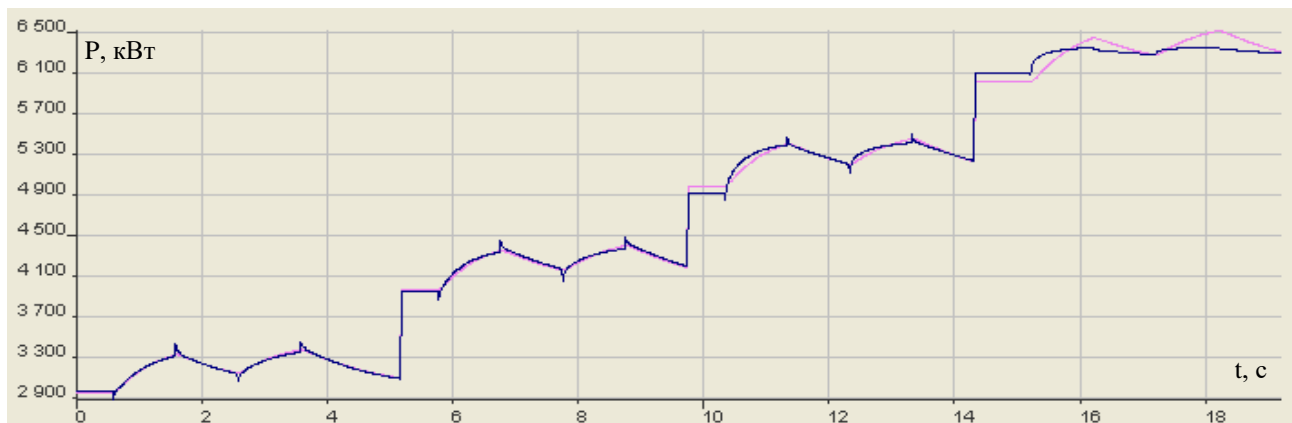


Рис. 7. Изменение вырабатываемой активной мощности синхронного генератора в обучающей выборке (розовая экспериментальная, синяя модельная)

VI. ТРЕТЬЯ ТЕСТИРУЕМАЯ АРХИТЕКТУРА

Используя архитектуру 3 слоя и 30 нейронов в каждом скрытом слое с обратной связью в ходе обучения алгоритма, также была получена математическая модель, и её результаты были сравнены с тестовой выборкой.

Результаты сравнения экспериментальных и модельных данных представлены на рис. 8 и рис. 9.

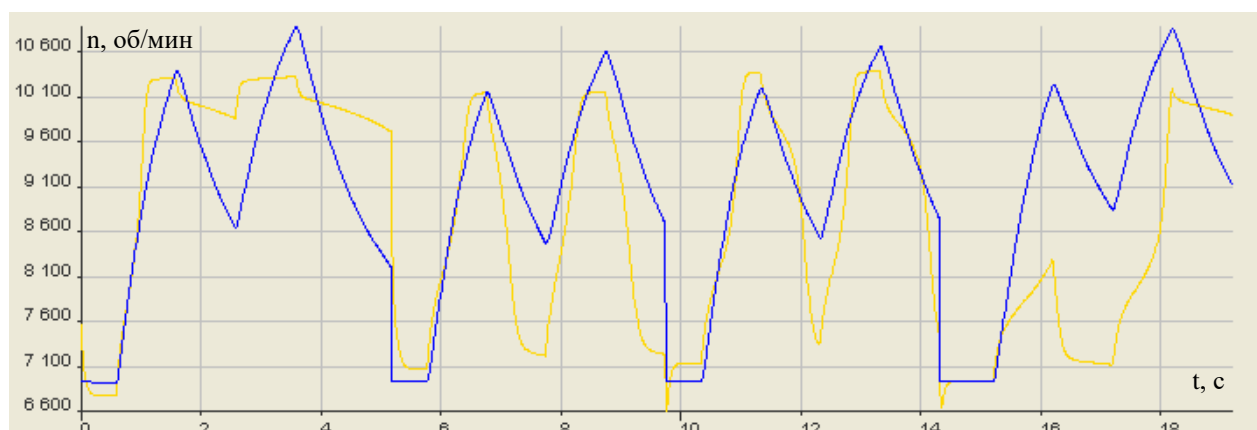


Рис. 8. Изменение частоты вращения свободной турбины в обучающей выборке (синяя экспериментальная, желтая модельная)



Рис. 9. Изменение вырабатываемой активной мощности синхронного генератора в обучающей выборке (розовая экспериментальная, синяя модельная)

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В итоге было рассмотрено 2 архитектуры, с обратной связью и без неё. Без обратной связи было проверено 2 архитектуры с разным количеством нейронов в скрытых слоях. При этом в среднем нейросетевые модели без обратных связей давали похожие результаты, объясняется это тем, что мощности сети было достаточно для аппроксимации газотурбинной электростанции, однако, на основе такой архитектуры сложно добиться необходимой точности системы, не удастся избавиться от «скачков», (например рис. 2, 3). Именно поэтому была протестирована рекуррентная архитектура, которая позволяет избавиться от «скачков» (рис. 6, рис. 7). Однако она значительно усложняет решение задачи в виду наличие обратных связей, что в некоторых случаях может приводить к взрывному росту значений весов и, как результат, плохой точности модели. В настоящее время исследования продолжаются.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- [1] Романов, В.В. Применение газотурбинных технологий—эффективный путь модернизации энергетики Украины / В. В. Романов, А. А. Филоненко, В.Н. Чобенко //Наукові праці. Серія «Техногенна безпека» Миколаїв: ЧДУ ім. П. Могили – 2005 – Т. 41 – С. 163-167.
- [2] Фам, Х. А. Состояние и перспективы развития энергетики Вьетнама / Х. А. Фам, В. А. Рассохин, К. Д. Андреев // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета СПб: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого – 2013 – С.32-35.
- [3] Кавалеров, Б. В. Алгоритм построения быстрорешаемой модели газотурбинной газоперекачивающей установки по экспериментальным данным/ Б.В. Кавалеров, Г.А. Килин, К.А. Один, И.В. Бахирев, А.Ю. Поварницын //Вестник ИжГТУ имени МТ Калашникова: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова" – 2013 – №. 3 – С. 116-118.
- [4] Кавалеров, Б. В. Алгоритм поиска нелинейной модели ГТУ для привода ГПА/ Б. В. Кавалеров, Г. А. Килин, И. В. Бахирев //Вестник ИжГТУ имени МТ Калашникова: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова" – 2014 – №. 2 – С. 133-136.
- [5] Килин, Г.А. Программный комплекс для получения математических моделей газотурбинных электростанций/ Г.А. Килин, К.А. Один, Б.В. Кавалеров // Системы управления и информационные технологии: "Научная книга" – 2015 – Т. 59 – № 1.1 – С. 145-148.
- [6] Стенды-имитаторы и их применение на различных стадиях жизненного цикла систем управления газотурбинных двигателей / Д.И. Волков, В.М. Грудинкин, В.А. Качура, А.А. Разладский//Авиационно-космическая техника и технология Харьков: – 2008 – №. 9 – С. 133-137.
- [7] Использование имитационного моделирования для оптимизации отладки форсажного контура ТРДДФ при приемо-сдаточных испытаниях / И. А. Кривошеев, Д. А. Ахмедзянов, А. Е. Кишалов, Е. С. Власова //Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета Уфа: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Уфимский государственный авиационный технический университет – 2006 – Т. 7. – №. 3 – С..
- [8] Васильев, В. И. Проектирование интеллектуальных систем управления ГТД на основе принципа минимальной сложности / Васильев В. И., Валеев С. С. //Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета Уфа: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Уфимский государственный авиационный технический университет – 2007 – Т. 9 – №. 2 – С.32-41.

- [9] Кривошеев И. А., Ахмедзянов Д. А., Годованюк А. Г. Стенды полунатурного моделирования ГТД и их САУ/ //Молодой ученый. – 2011. – №. 26. – С. Т. 1. 39-42.
- [10] Формирование подходов к моделированию авиационных газотурбинных двигателей совместно с элементами систем автоматического управления, контроля и диагностики
- [11] Епифанов, С. В. Синтез и анализ перспективной САУ ГТД / С. В. Епифанов, Е. А. Кононыхин //Авиационно-космическая техника и технология Харьков: – 2013 – №. 10 – С. 82-86.
- [12]Кавалеров, Б. В. Мини-электростанции на базе конвертированных авиационных двигателей: проблемы управления и испытания САУ ГТУ/ Б. В. Кавалеров, А. В. Ромодин //Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова Якутск: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова – 2011 – Т. 8 – №. 3 –С. 42-49.
- [13]Друки, А. А. Применение сверточных нейронных сетей для выделения и распознавания автомобильных номерных знаков на изображениях со сложным фоном/ А. А. Друки // Известия Томского политехнического университета: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" – 2014 – Т. 324 – №. 5 – С.85-92.
- [14]Солдатова, О. П. Применение сверточной нейронной сети для распознавания рукописных цифр/ О. П. Солдатова, А. А. Гаршин //Компьютерная оптика: Институт систем обработки изображений РАН – филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук»– 2010 – Т. 34 – №. 2 – С.252-259.
- [15]Дорогой, Я. Ю. Архитектура обобщенных сверточных нейронных сетей / Я. Ю. Дорогой // ВісникНаціональноготехнічногоуніверситетуУкраїни: Национальный технический университет Украины Киевский политехнический институт – 2011 – №. 54 – С. 229-234.
- [16]Нгуен, Т. Т. К. Обнаружение и распознавание текстов на изображениях сложных графических сцен с помощью сверточных нейронных сетей / Т. Т. К. Нгуен //Электротехнические и компьютерные системы: Одесский национальный политехнический университет– 2014 – №. 13 – С. 125-130.
- [17]Розалиев, В. Л. Применение нейронных сетей и грануляции при построении автоматизированной системы определения эмоциональной реакции человека / В. Л. Розалиев, А. С. Бобков, О. С. Федоров // Известия волгоградского государственного технического университета:Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Волгоградский государственный технический университет» – 2010 – Т. 11 – №. 9 – С.63-67.
- [18]Artificial neural network-based system identification for a single-shaft gas turbine / Н. Asgari,X.Q. Chen,M. B. Menhaj,R. Sainudiin //Journal of Engineering for Gas Turbines and Power: American Society of Mechanical Engineers – 2013 – Т. 135 – №. 9 – С. 092601 - 7.
- [19]Asgari, H. Modeling and simulation of gas turbines / Н. Asgari, X.Q. Chen, R. Sainudiin // International Journal of Modeling, Identification and Control: Inderscience – 2013 – Т. 20 – №. 3 – С. 253-270.
- [20]Жернаков, С. В. Идентификация обратной многорежимной модели ГТД по параметрам его масляной системы на основе технологии нейронных сетей/ С. В. Жернаков, Р. Ф. Равилов //Вестник ИжГТУ имени МТ Калашникова: Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова – 2011 – №. 3 – С. 126-129.
- [21]Гуревич О.С. Управление авиационными газотурбинными двигателями: Учебное пособие. М.: Изд-во МАИ, 2001. 100 с.
- [22]Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание. Издательский дом Вильямс, 2008.
- [23]Роберт К. Основные концепции нейронных сетей/Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс. 2001.
- [24]Егупов Н. Д. и др. Методы робастного, нейронечеткого и адаптивного управления. М.: МГТУ им. НЭ Баумана. 2002.
- [25]Пархоменко, С. С. Обучение нейронных сетей методом Левенберга-Марквардта в условия большого количества данных / С. С. Пархоменко, Т. М. Леденёва //Вестник Воронежского ун-та. Серия: Системный анализ и информационные технологии: Воронежский государственный технический университет – 2014. – №. 2. – С. 98-106.
- [26] Кривошеев И. А., Ахмедзянов Д. А., Годованюк А. Г. Стенды полунатурного моделирования ГТД и их САУ/ //Молодой ученый. – 2011. – №. 26. – С. Т. 1. 39-42.
- [27] Седристый, В. А. Степаненко. Опыт разработки и применения интеллектуальных испытательных стендов авиационных газотурбинных двигателей при доводке цифровых САУ/ В.А. Седристый, С.В. Лозня, С.А. Пустовой, И.И. Степаненко. // “Інформаційні системи, обчислювальна й електронна техніка, системи зв'язку та прикладобудування: – 2009
- [28]Буряченко, А. Г. Стенд-имитатор турбовального двигателя АИ-450М для испытаний регулятора двигателя. Метрологическое обеспечение и аттестация стенда/ А. Г. Буряченко, В. М. Грудинкин, Д. С. Бурунов //Вісник двигунобудування: Запорожский национальный технический университет – 2015 – №. 2 – С.95-101.